УДК 621.313

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА ДИСКОВОГО ТИПА

А.И. Чучалин, И.О.Муравлев, И.А. Сафьянников, И.Н. Россамахин

Томский политехнический университет
E-mail: refer@tpu.ru

Для устройств обеззараживания воды и воздуха, а также для другого электрофизического оборудования необходимы источники питания с высоким напряжением ~10^4 В при частотах 10^2...10^3 Гц. Авторами проведен комплекс исследований, разработанного индукторного генератора дисковой конструкции, с учетом несинусоидального характера изменения индуктивностей обмоток генератора, переменного насыщения магнитной цепи, нагрева генератора при работе в продолжительном режиме с целью определения оптимальных соотношений параметров генератора и основных энергетических характеристик.

С развитием новых технологий увеличивается число потребителей электроэнергии средней мощности 10^4 Вт, которые необходимо питать высоким переменным напряжением ~10^4 В при частоте 10^2...10^3 Гц. К ним относятся автономные установки с активно-емкостным характером нагрузки, в том числе: мобильные озоногенерирующие устройства для очистки воды и воздуха, установки по обеззараживанию воды, требующие компактных автономных источников электроэнергии. Традиционно питание таких потребителей осуществляется за счет преобразования напряжения и частоты первичных источников электроэнергии, таких как промышленная сеть или автономный электромашинный генератор [1–4].

Решение этой проблемы возможно путем совершенствования существующих или создания новых типов автономных электромашинных генераторов, способных удовлетворять возрастающие требования потребителей. На рис. 1 представлена конструкция и электрическая схема генератора дискового типа. Электрическая схема генератора включает ОВ – обмотку возбуждения, РО – рабочую обмотку генератора, S – коммутирующее устройство. Генератор состоит из ротора – 1 (вращающийся модуль) и статора, который включает в себя блок – 2 с сосредоточенными катушками рабочей обмотки (РО) – 6 и крайние дисковые модули – 3 с обмоткой возбуждения (ОВ) – 5. Ротор выполнен в виде дисков с участками различной проводимости для основного магнитного потока: шихтованными ферромагнитными полюсными вставками – 4 и воздушными промежутками между ними. Внешние магнитопроводы – 3 также выполняют функцию подшипниковых щитов.

Принцип действия генератора основан на создании ЭДС в рабочей обмотке статора при изменении магнитного потока за счет магнитных проводимостей воздушного зазора и изменении собственных индуктивностей обмоток машины. Переменная ЭДС рабочей обмотки на холостом ходу создается в результате изменения ее потокосцепления Ψ_a за счет переменной взаимной индуктивности $M_{ав}$ с обмоткой возбуждения, запитанной постоянным током

$$e_a = -\frac{d\Psi_a}{dt} = -i_в \frac{dM_{ав}}{dt}.$$

Для предварительного исследования характеристик дискового генератора использована методика расчета параметров генератора на основе эквивалентных схем замещения для магнитной цепи. Математическая модель для расчета переходных и рабочих режимов генератора основана на численном решении дифференциальных уравнений электрического равновесия, составленных в соответствии с электрической схемой замещения представленной на рис. 1:

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = -(R_a + R_н)\, i_a - U_c\,, \quad \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C_н}\, i_a\,,$$

$$\frac{d\Psi_в}{dt} = U_в - R_в i_в\,,$$

где $U_в$, U_c – напряжения на зажимах обмотки возбуждения и емкостной составляющей нагрузки; Ψ_a, $\Psi_в$ – потокосцепления обмоток статора и возбуждения; i_a, $i_в$ – токи, протекающие по обмоткам; R_a, $R_в$ – активные сопротивления обмоток.

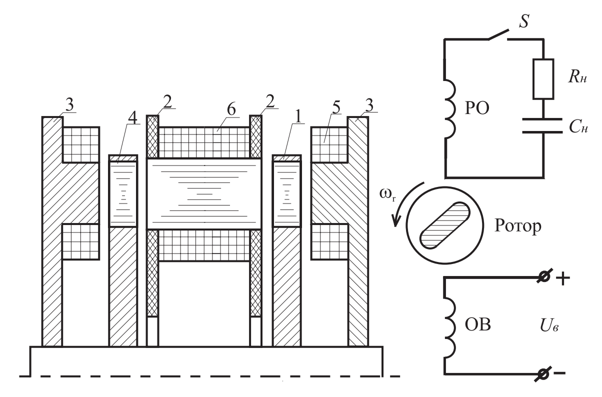


Рис. 1. *Конструкция и электрическая схема генератора дискового типа, $U_в$ – напряжение возбуждения, $R_н$, $C_н$ – активная и ёмкостная составляющие нагрузки*

Предварительные расчеты основных энергетических параметров электромашинного индукторного генератора дискового типа при допущении о гармоническом характере изменения индуктив-

ностей обмоток показали возможность достижения мощности, напряжения и частоты для питания вышеуказанного оборудования [5]. Для детального исследования рабочих режимов генератора необходимо решить задачу учета ряда факторов, влияющих на его основные характеристики: несинусоидальный характер изменения индуктивностей обмоток генератора, переменное насыщение магнитной цепи, нагрев генератора при работе в продолжительном режиме.

Тепловые ограничения при работе генератора в продолжительном режиме являются важным фактором, определяющем предельные показатели по удельной мощности генератора. При этом основным, ограничивающим генерируемую мощность в нагрузке, является температура изоляции обмоток генератора.

Для исследования рабочих режимов с учетом реальных кривых изменения индуктивностей генератора использован расчет электромагнитных параметров генератора на основе решения серии полевых задач. Математическая модель расчета магнитного поля методом конечных разностей в индукторном генераторе дисковой конструкции позволила произвести расчет потокосцеплений обмоток и соответствующую матрицу индуктивностей $[L_i] = f(\gamma)$, при различных угловых положениях ротора относительно статора [6].

Полученные несинусоидальные зависимости были представлены рядом Фурье, основанным на замене определенного интеграла суммой конечного числа слагаемых [7]. Зависимости собственных (L_a, $L_в$) и взаимной ($M_{ав}$) индуктивностей обмоток статора от угла поворота ротора имеют вид

$$L_a = 51{,}571 + 30{,}281 \cdot \cos\gamma + 1{,}483 \cdot \cos(2\gamma) + 3{,}024 \cdot \cos(3\gamma) + 0{,}434 \cdot \cos(4\gamma);$$

$$L_в = 14{,}093 + 7{,}694 \cdot \cos\gamma + 0{,}072 \cdot \cos(2\gamma) + 0{,}43 \cdot \cos(3\gamma) + 0{,}163 \cdot \cos(4\gamma);$$

$$M_{ав} = 20{,}1 + 16{,}47 \cdot \cos\gamma + 0{,}9457 \cdot \cos(2\gamma) + 0{,}941 \cdot \cos(3\gamma) + 0{,}2974 \cdot \cos(4\gamma).$$

Для учета переменного насыщения магнитной цепи проведен расчет кривой намагничивания машины в относительных единицах $\Phi_0 = f(F_{ов})$ рис. 2 (кривая 1). Касательная 2 к начальной части кривой 1 рис. 2, представляет собой зависимость магнитного потока от намагничивающей силы воздушного зазора $\Phi_0 = f(F_\delta)$. Степень насыщения магнитной цепи генератора характеризуется коэффициентом насыщения, который можно определить в виде (рис. 2):

$$k_\mu = \frac{F_{ов}}{F_\delta} = \frac{AC}{AB}.$$

Учет насыщения осуществляется коэффициентом k_μ в кривых изменения индуктивностей обмоток генератора, т.е. $L = k_\mu \cdot f(\gamma)$, для различных значений индукций полюса рабочей обмотки (B_a).

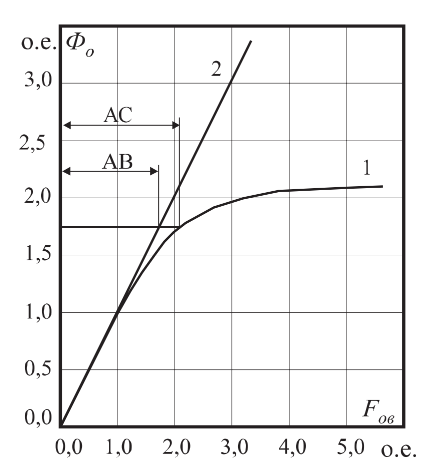


Рис. 2. *Кривая намагничивания генератора*

В результате математического моделирования переходных процессов и установившихся режимов нагрева обмоток и конструкционных элементов генератора дискового типа выявлены особенности нагрева и охлаждения машины данного конструктивного исполнения [6, 8].

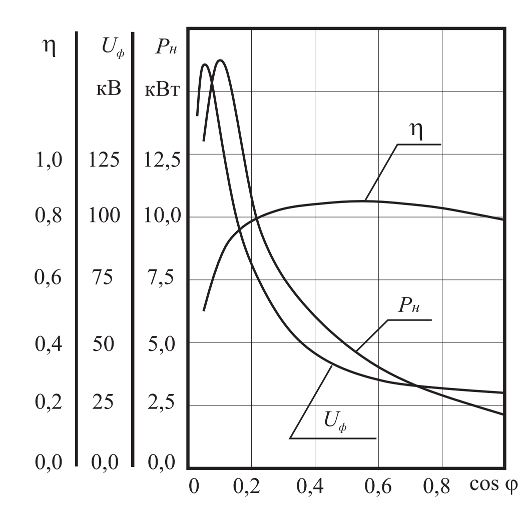


Рис. 3. *Зависимости активной мощности, напряжения фазы, КПД от коэффициента мощности*

Для расчета энергетических характеристик генератора дискового типа и определения оптимального значения сопротивления нагрузки и коэффициента мощности, с целью достижения максимальных удельных энергетических показателей, проведены исследования допустимого времени работы на активно-емкостную нагрузку с учетом насыщения, несинусоидальных кривых изменения индуктивностей и тепловых ограничений. Расчеты выполнялись для генератора с диаметром активной зоны 0,33 м, числом полюсов $2p = 8$ и напряжением возбуждения $U_в$=240 В при его работе на активно-емкостную нагрузку с постоянной частотой вращения ротора n=3000 об/мин в продолжительном режиме. На рис. 3 представлены зависимости активной мощности, напряжения в рабочей обмотке и КПД от коэффициента мощности $P_н$, $U_ф$,

$\eta = f(\cos\varphi)$, при оптимальном соотношении $C_н$ и $R_н$, обеспечивающим максимальные энергетические характеристики генератора [9].

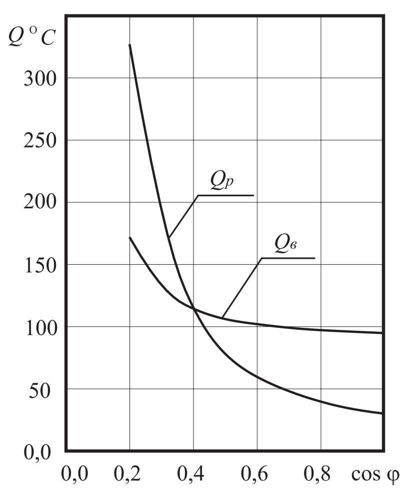


Рис. 4. *Значения установившихся температур в обмотках от коэффициента нагрузки*

составляющих нагрузки ($R_н$, $C_н$) и коэффициентах мощности. Максимальное значение плотности тока рабочей обмотки $J_a \approx$ 6,5 А/мм^2 соответствует сопротивлению нагрузки 16 кОм при коэффициенте нагрузки 0,3. При этом установившиеся температуры в обмотке возбуждения и рабочей обмотке составляют $Q_в$=130 °С и $Q_р$=175 °С (рис. 4). Плотность тока обмотки возбуждения изменяется в небольших пределах в зависимости от сопротивления и вида нагрузки $J_b \approx$ 3,5...4,5 А/мм^2.

В результате анализа полученных энергетических характеристик индукторного генератора дисковой конструкции установлено, что по условиям электрической прочности изоляции и нагрева обмоток, генератор способен работать в продолжительном режиме, начиная с $\cos\varphi$ = 0,4 при максимальной мощности потерь в меди $P_{Cu} \approx$ 475 Вт и потерь в стали $P_{Fe} \approx$ 75 Вт (при индукции в полюсах 1,0 Тл и частоте 400 Гц) с установившейся температурой рабочей обмотки $Q_р$=110 °С (рис. 4). При этом активная мощность генератора составляет $\approx$ 6,0 кВт, напряжение на рабочей обмотке $\approx$ 50 кВ.

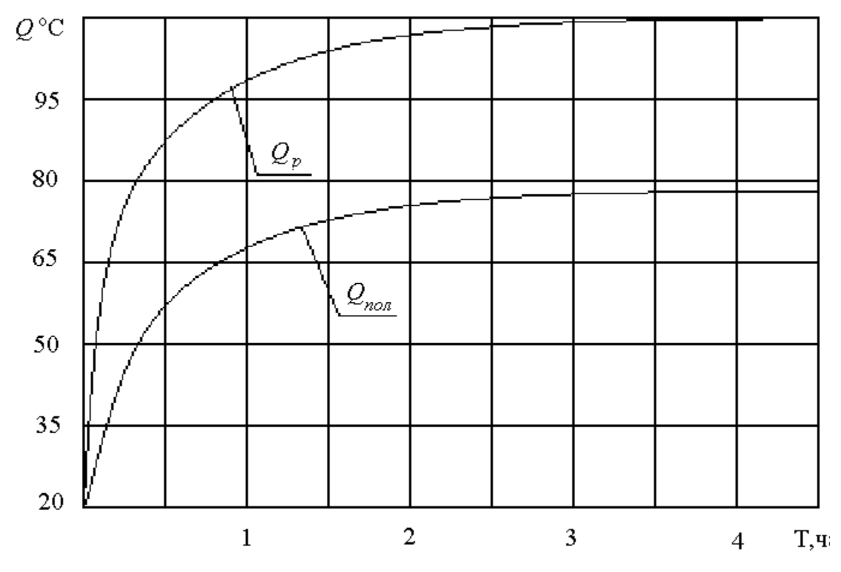


Рис. 5. *Кривые изменения температур рабочей обмотки ($Q_р$) и полюсов ($Q_{пол}$) при работе в длительном режиме*

Анализируя полученные зависимости, можно определить, что наибольшее значение коэффициента полезного действия η = 0,85 соответствует $\cos\varphi$ = 0,5 при условии максимальной активной мощности в нагрузке $P_{нmax} \approx$ 5 кВт и напряжении на рабочей обмотке $U_ф$ = 40 кВ. Для $\cos\varphi$ = 0,3 максимальное значение мощности $P_{нmax} \approx$ 7,5 кВт достигается при активном сопротивлении $R_н$ = 16 кОм, которому соответствует напряжение 60 кВ.

Допустимая продолжительность работы генератора в длительном режиме определяется нагревом рабочей обмотки с учетом плотности тока J_a, определяющей энергию потерь в проводниках обмоток, при различных значениях активной и ёмкостной

На рис. 5 показаны расчетные кривые изменения температуры рабочей обмотки и полюсов при включении генератора на длительный режим с указанными значениями мощности и напряжения.

Таким образом, выполненные расчеты энергетических характеристик индукторного генератора дисковой конструкции при работе на активно-емкостную нагрузку в продолжительном режиме с учетом несинусоидального характера изменения индуктивностей и тепловых ограничений подтвердили возможность эффективного применения генератора в качестве источника электроэнергии для питания потребителей с высоким напряжением при частоте до сотен герц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы в электрофизических установках. – Л.: Наука, 1977. – 197 с.
2. Глухих В.А. Мощные энергетические комплексы современных электрофизических установок // Импульсные источники энергии: Тез. докл. 3 Всес. конф. – М.: ЦНИИатоминформ, 1989. – С. 169–170.
3. Mark H. Electromagnetic Launch Technology: The Promise and Problems // IEEE Transactions on Magnetic. – 1990.– Vol. 25, № 1. – P. 17–19.
4. Горбачев Г.Н. Источники питания генератора озона // Электротехника. – 1993. – № 11. – С. 63–65.
5. Чучалин А.И., Муравлев И.О., Сафьянников И.А. Дисковый индукторный генератор // Электромеханика. – 2000. – № 4. – С. 27–31.
6. Чучалин А.И., Муравлев И.О., Сафьянников И.А. Математическое моделирование индукторного генератора дискового типа // Электричество. – 2001. – № 11. – С. 30–35.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с.
8. Chuchalin A.I., Muravlyov I.O., Safyannikov I.A. Heating and cooling of disk inductor generator // VI International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates, and Young Scientists, Modern techniques and technology, MTT'2000, February 28 – March 3, 2000, TPU, Tomsk, Russia, 2000. – P. 170–172.
9. Chuchalin A.I., Muravlyov I.O., Safyannikov I.A., Rossamakhin I.N. Energetic parameters of inductor generator // The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS'99, Abstracts, June, 20–25, 1999 at Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, 1999. – Vol. 2. – P. 807.

УДК 621.34